

系統補償直列コンデンサの設置地点について

鈴木福太郎*・川本 昂**・斉藤 清吉*

On the Location of Series Capacitors in
Series-Compensated Power Systems

Fukutaro Suzuki, Akira Kawamoto, Seikichi Saitō

(Received Dec. 15, 1977)

In this paper, the location of series capacitors in power transmission systems is investigated. Under no-load condition in power systems, it is proved that the series capacitors should be located on the side of the sending end. On the other hand, this paper points out that in contrast with positive Ferranti phenomena has been known as Ferranti effect since early period negative Ferranti phenomena which causes voltage drop at the receiving end under no-load and excessive compensation conditions exists, and also describes on the merits and demerits.

1 緒 言

大容量長距離送電線の定電圧確保や安定度向上対策として系統への直列コンデンサ適用が考えられ、各国で採用されている。また直列コンデンサ適用に伴う特殊現象については古くから研究・解明がなされ、対策が報じられてきている。しかし、最近では実系統に於て、同期機の軸ねじれ共振現象などの新たな問題が生じ検討¹⁻³⁾が加えられている現状でもある。この直列コンデンサの適用に関しては未だ充分に明らかにされていない点も少なくないと思われる。特に、直列コンデンサの設置地点についての研究⁴⁾は筆者の知見し得る限りではあまり見当たらない。

本稿では直列コンデンサの設置地点について3つのモデルを考え、直列コンデンサはどこに置くべきかについて、基本的な比較評価を述べている。また、無負荷時に生じるいわゆるフェランチ現象とは逆の作用をする負のフェランチ現象が、補償された系統には生じ得ることを明らかにするとともに、その特質について定性的に解明している。

2 直列コンデンサの設置地点と線路途中の電位分布基礎方程式

直列コンデンサの設置地点を(a)送電端設置(b)線路中央設置(c)受電端設置の3つに分けて考えると、直列コンデンサ補償系統の一般回路定数は、直列コンデンサの容量リアクタンスを X_C 、送受電端変圧器の漏洩リアクタンスをそれぞれ X_B, X_R とする時、Table 1に示されるように与えられる。

* 電気工学科

** 福井工業高専

Table 1 General circuit constant in series
compensated power systems

Location	\dot{A}	\dot{B}	\dot{C}	\dot{D}
Receiving end	$\dot{A}_0 + jX_S \dot{C}_0$	$\dot{B}_0 - X_S(X_R - X_C) \dot{C}_0 + jX_S \dot{D}_0 + j(X_R - X_C) \dot{A}_0$	\dot{C}_0	$\dot{D}_0 + j(X_R - X_C) \dot{C}_0$
Center	$\dot{A}_0 + X_S X_C \dot{C}_1^2 + j(X_S \dot{C}_0 - X_C \dot{A}_0) \dot{C}_1$	$\dot{B}_0 - X_S X_R \dot{C}_0 + X_S X_C \dot{C}_1 \dot{D}_1 + X_R X_C \dot{A}_1 \dot{C}_1 + j(X_S \dot{D}_0 + X_R \dot{A}_0 - X_C \dot{A}_1 \dot{D}_1 + X_S X_R X_C \dot{C}_2)$	$\dot{C}_0 - jX_C \dot{C}_1^2$	$\dot{D}_0 + X_R X_C \dot{C}_1^2 + j(X_R \dot{C}_0 - X_C \dot{D}_1) \dot{C}_1$
Sending end	$\dot{A}_0 + j(X_S - X_C) \dot{C}_0$	$\dot{B}_0 - X_R(X_S - X_C) \dot{C}_0 + jX_R \dot{A}_0 + j(X_S - X_C) \dot{D}_0$	\dot{C}_0	$\dot{D}_0 + jX_R \dot{C}_0$

ここで、 \dot{A}_0 、 \dot{B}_0 、 \dot{C}_0 、 \dot{D}_0 は直列コンデンサ設置前の系統の一般回路定数、 \dot{A}_1 、 \dot{B}_1 、 \dot{C}_1 、 \dot{D}_1 は $1/2$ 線路互長の場合の一般回路定数を表わす。

均一分布定数線路の場合、線路途中の任意点 x に於ける電圧・電流基礎方程式は次のように与えられる。

(I) 送電端設置

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_X &= \dot{E}_R \left\{ \cosh \dot{\gamma}(\ell - x) + j(X_S - X_C) \frac{1}{Z_W} \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) \right\} \\ &+ \dot{I}_R \left\{ \dot{Z}_W - X_R(X_S - X_C) \frac{1}{Z_W} \right\} \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) + j(X_S + X_R - X_C) \cosh \dot{\gamma}(\ell - x) \Big\} \\ \dot{I}_X &= \dot{E}_R \frac{1}{Z_W} \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) + \dot{I}_R \left\{ \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) + jX_R \frac{1}{Z_W} \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

(II) 受電端設置

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_X &= \dot{E}_R \left\{ \cosh \dot{\gamma}(\ell - x) + jX_S \frac{1}{Z_W} \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) \right\} \\ &+ \dot{I}_R \left\{ \left(\dot{Z}_W - X_S(X_R - X_C) \frac{1}{Z_W} \right) \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) + j(X_S + X_R - X_C) \cosh \dot{\gamma}(\ell - x) \right\} \\ \dot{I}_X &= \dot{E}_R \frac{1}{Z_W} \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) + \dot{I}_R \left\{ \cosh \dot{\gamma}(\ell - x) + j(X_R - X_C) \frac{1}{Z_W} \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(III) 線路中央設置

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_X &= \dot{E}_R \left\{ \cosh \dot{\gamma}(\ell - x) + X_S X_C \frac{1}{Z_W} \sinh \dot{\gamma} \frac{(\ell - x)}{2} + j(X_S - \frac{1}{2} X_C) \frac{1}{Z_W} \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) \right\} \\ &+ \dot{I}_R \left\{ \left(\dot{Z}_W + \left(\frac{1}{2} X_S X_C + \frac{1}{2} X_R X_C - X_S X_R \right) \frac{1}{Z_W} \right) \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) \right. \\ &\left. + j \left((X_S + X_R) \cosh \dot{\gamma}(\ell - x) + X_S X_R X_C \frac{1}{Z_W} \sinh^2 \dot{\gamma} \frac{(\ell - x)}{2} - X_C \cosh^2 \dot{\gamma} \frac{(\ell - x)}{2} \right) \right\} \\ \dot{I}_X &= \dot{E}_R \left\{ \frac{1}{Z_W} \sinh \dot{\gamma}(\ell - x) - jX_C \frac{1}{Z_W} \sinh^2 \dot{\gamma} \frac{(\ell - x)}{2} \right\} + \dot{I}_R \left\{ \cosh \dot{\gamma}(\ell - x) \right. \\ &\left. + X_R X_C \frac{1}{Z_W} \sinh^2 \dot{\gamma} \frac{(\ell - x)}{2} + j(X_R - \frac{1}{2} X_C) \frac{1}{Z_W} \sinh \dot{\gamma} \frac{(\ell - x)}{2} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

記 号

ℓ : 線路全長	\dot{I}_R : 受電端電流
x : 送電端からの距離	L : 線路インダクタンス (単位線路長当り)
\dot{i} : 伝搬定数 (単位線路長当り)	C : 対地静電容量 (")
\dot{Z}_W : 波動インピーダンス	α : 減衰定数 (")
\dot{E}_X : x 地点における線路電圧	β : 位相定数 (")
\dot{I}_X : x 地点における線路電流	$\omega = 2\pi f$: 角速度
\dot{E}_R : 受電端電圧	f : 周波数

上式にて、無損失線路と見なせば、変圧器の抵抗、線路抵抗、および漏洩コンダクタンスは零となるから、伝搬定数 $\dot{i} = j\omega\sqrt{LC} = j\beta$ は純虚数となり、波動インピーダンス $\dot{Z}_W = \sqrt{L/C}$ は純抵抗となる。これらの条件より式(1), (2), (3)は次のようになる。

(I) 送電端設置

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_X &= \dot{E}_R \left\{ \cos \beta(\ell-x) - (X_S - X_C) \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta(\ell-x) \right\} \\ &\quad + j \dot{I}_R \left\{ \left[\sqrt{\frac{L}{C}} - X_R(X_S - X_C) \sqrt{\frac{C}{L}} \right] \sin \beta(\ell-x) + (X_R + X_S - X_C) \cos \beta(\ell-x) \right\} \\ \dot{I}_X &= \dot{E}_R \cdot j \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta(\ell-x) + \dot{I}_R \left\{ \cos \beta(\ell-x) - X_R \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta(\ell-x) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

(II) 受電端設置

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_X &= \dot{E}_R \left\{ \cos \beta(\ell-x) - X_S \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta(\ell-x) \right\} \\ &\quad + j \dot{I}_R \left\{ \left[\sqrt{\frac{L}{C}} - X_S(X_R - X_C) \sqrt{\frac{C}{L}} \right] \sin \beta(\ell-x) + (X_S + X_R - X_C) \cos \beta(\ell-x) \right\} \\ \dot{I}_X &= \dot{E}_R \cdot j \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta(\ell-x) + \dot{I}_R \left\{ \cos \beta(\ell-x) - (X_R - X_C) \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta(\ell-x) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

(III) 線路中央設置

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_X &= \dot{E}_R \left\{ \cos \beta(\ell-x) - \left(X_S - \frac{1}{2} X_C \right) \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta(\ell-x) + j X_S X_C \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta \frac{(\ell-x)}{2} \right\} \\ &\quad + j \dot{I}_R \left\{ \left[\sqrt{\frac{L}{C}} + \left(\frac{1}{2} X_S X_C + \frac{1}{2} X_R X_C - X_S X_R \right) \sqrt{\frac{C}{L}} \right] \sin \beta(\ell-x) \right. \\ &\quad \left. + (X_S + X_R) \cos \beta(\ell-x) - X_S X_R X_C \left(\frac{C}{L} \right) \sin^2 \beta \frac{(\ell-x)}{2} - X_C \cos^2 \beta \frac{(\ell-x)}{2} \right\} \\ \dot{I}_X &= \dot{E}_R \cdot j \left\{ \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta(\ell-x) - X_C \left(\frac{C}{L} \right) \sin^2 \beta \frac{(\ell-x)}{2} \right\} + \dot{I}_R \left\{ \cos \beta(\ell-x) \right. \\ &\quad \left. + X_R X_C \left(\frac{C}{L} \right) \sin^2 \beta \frac{(\ell-x)}{2} - \left(X_R - \frac{1}{2} X_C \right) \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta \frac{(\ell-x)}{2} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

さらに、無負荷時には $\dot{I}_R = 0$ となるので、式(4), (5), (6)はいずれも、 \dot{E}_X と \dot{E}_R は大きさだけの関係となり、また、 \dot{I}_X や \dot{I}_S , \dot{I}_R の間にも位相のずれはない。

無負荷、無損失線路として、直列コンデンサの各設置場所に対して、送電端電圧 \dot{E}_S に対する線路途中の任意点 x の電圧 \dot{E}_X の比を求めると次式がえられる。簡単のために、変圧器部分は含めず、線路部分のみについて示してある。また、送電端設置の場合、完全補償されているとして、他の場

合と比較する。

送電端設置

$$\frac{\dot{E}_X \cos \beta(\ell-x) + X_C \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta(\ell-x)}{\dot{E}_S \cos \beta\ell - X_C \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta\ell}$$

線路中央設置

$$\frac{\dot{E}_X \cos \beta(\ell-x) + \frac{X_C}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta(\ell-x)}{\dot{E}_S \cos \beta\ell + \frac{X_C}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta\ell}$$

受電端設置

$$\frac{\dot{E}_X \cos \beta(\ell-x)}{\dot{E}_S \cos \beta\ell}$$

3. 線路の電位分布に与える設置地点の影響

無負荷時における線路全長に亘っての電位分布は、Fig.1に示される。ただし、集中定数である直列コンデンサの容量リアクタンスは均一分布定数回路においては均一に分配されることになる。図中の曲線(I)，(II)，(III)より、受電端設置と線路中央設置については、直列コンデンサ設置にもかかわらず、フェランチ効果による受電端の電圧上昇は押えることができない。しかし、送電端側に設置された直列コンデンサは受電端における線路電圧の上昇を押えていることがわかる。

ここに、直列コンデンサの送電端設置は、事故時に負荷を切り離すような場合、フェランチ現象に対する抑制効果を発揮することが見出される。一方、受電端設置と線路中央設置は、無負荷時にフェランチ現象をもたらすことになる為、受電端に設置された直列コ

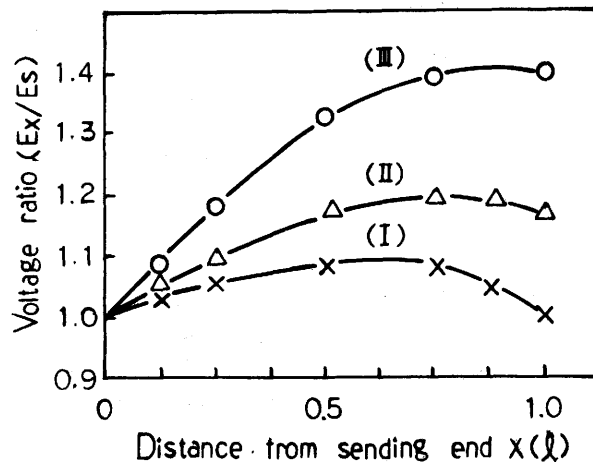


Fig.1 Voltage distribution in compensated systems under no-load condition ;

$$X_C \sqrt{\frac{C}{L}} = 0.41, \sqrt{\frac{C}{L}} = 377 \Omega, l = 624.7 \text{ km}$$

$$\beta = 1.257 \times 10^{-3} \text{ rad/km}$$

compensation $K = 100\%$

(I) Sending end (II) Center

(III) Receiving end

ンデンサは全く役立たないことになる。さらに、付言するならば、前稿⁵⁾で指摘したように、フェランチ現象の実現に積極的に寄与しているのは、主に送電端変圧器の漏洩リアクタンスであるが、受電端変圧器の漏洩リアクタンスはフェランチ現象に対しては何等関わりを持たない有用な存在である。⁶⁾それゆえ、直列コンデンサは、送電端設置の場合、有負荷、無負荷ともに、有害な存在である送電端変圧器の漏洩リアクタンスの作用を打ち消すのに対し、受電端設置の場合有負荷時には、有用な存在である受電端変圧器の漏洩リアクタンスの働きを打ち消すことになる。無負荷時には、前述したように、直列コンデンサは全く存在しないに等しくなる。したがって、同じ直列コンデンサ

による補償といっても、設置地点の違いによって、その特質が異なってくるというのは留意されるべきことと思われる。

次に、実際に負荷がかかっている場合について述べる。軽負荷の場合は大略、無負荷の場合と類似の結果となるので、特に重負荷の場合について言及する。重負荷時には、線路途中の電圧はFig. 2 (a) に示されるように電圧の低い方に弯曲している。これは送電端では遅電流のために正の電圧降下となり受電端では進電流により負の電圧降下を生じているからである。なお、この場合、直列コンデンサによる補償は全くなく、調相設備により送電端電圧は受電端電圧の10パーセント増に定電圧保持をはかっている。

さて、直列コンデンサ設置における線路途中の電位分布をモデル化して、受電端設置と送電端設置についての特徴を考察することとする。これらの関係についてはFig. 2 (b), (c) に示されているが、簡単のために、送受電端変圧器の漏洩リアクタンスを集中的でなく、線路上に分散させて扱い、線路の誘導リアクタンスを含めて考えていく。また、Fig. 2 (b), (c) は共に直列コンデンサは集中定数として取扱っている。ここに、80パーセントの不足補償として議論を進めることにする。(i)で示される曲線は直列コンデンサを設置した線路を無負荷にした時の電位分布を表わしている。Fig. 2 (b), (c) の電位分布が違うのは送電端設置の場合、直列コンデンサが有効に働いているからである。ここで、受電端に直列コンデンサを設置した場合にはFig. 2 (b) のような電位分布となり、(iii)で示される

ように、受電端での負の電圧降下によりその電圧を上昇させるが、不足補償による受電端電圧の低下はまぬがれない。そこでこれを補う為に進相電流を流して受電端での電圧上昇をはかる必要が生じる。また、Fig. 2 (c) において、送電端側に直列コンデンサを設置した場合には、送電端での電圧上昇があるが、不足補償による受電端電圧の低下を補う為に、同じく進相電流が必要になってくる。ここで、重負荷時に短絡事故等にて無負荷となった場合、受電端での電圧上昇は、送電端設

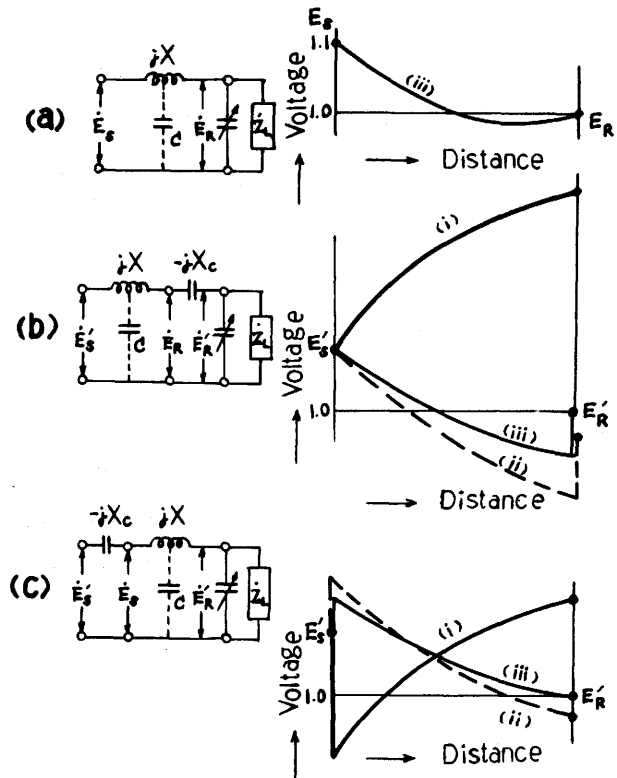


Fig. 2 Voltage distribution—model in compensated systems under heavy-load condition
(i) no-load condition, (ii) heavy-load condition (no phase modification)
(iii) heavy-load condition (phase modification), $X_C = 0.8X$: undercompensation

置に比べて受電端設置の方がはるかに大きいということから、直列コンデンサは送電端側に設置すべきであるということがわかる。また、不足補償である限り次節で述べる負のフェランチ効果による被害はまぬがれることができる。

一方、完全補償の場合には、各種の異常現象が現われるという問題があるが、負荷電流に対しては直列コンデンサの位置は無関係であり、どこに置いてもその違いはない。しかし、完全補償でも無負荷の場合には、受電端側に直列コンデンサを設置したのではまともにフェランチ効果をうけてしまうので、送電端側に設置すべきであるといえる。ここで、系統全体の誘導リアクタンスを完全に補償する直列コンデンサを入れた場合、調相設備は不要となるけれども、完全補償の場合に懸念される各種の異常現象を避けるためには不足補償にとどまる必要がある。また、受電端位置にある誘導リアクタンスは、こうした異常現象の構成部分中に存在しており、異常現象に接近しないためにも重要な存在と考えられる。なお、実際問題として、直列コンデンサを実系統のどこに置くかについては、その効果、および経済性等の観点から決定されるけれども、こうした設置についての基本的な考え方を把握することは、それを判断する上で重要なことと思われる。

4 負のフェランチ効果と正のフェランチ効果

電力系統において、無負荷時に生ずるフェランチ現象は一般的には補償のない系統での受電端電圧の上昇であるが、補償された系統にはある条件のもとで、逆に受電端電圧が降下することがある。ここで、前者を正のフェランチ効果、後者を負のフェランチ効果と呼ぶことにする。これは従来のフェランチ効果とは反対に、無負荷時に受電端電圧が下がるという意味で正に対し負とした。

さて、正のフェランチ効果は周知の通り、線路中の対地分布静電容量の存在によって生じるのみならず、受電端負荷電流の進相分によっても類似の事態を招くのが実状である。またフェランチ現象の要因としては対地分布静電容量、進相負荷電流の他に誘導リアクタンスの存在があげられよう。この誘導リアクタンスとしては、線路の誘導リアクタンスと、送受電両端変圧器の漏洩リアクタンスが主たるものであり、この異常電圧についての対策としては進相電流を低減したり、系統中の全誘導リアクタンスを抑えることがあげられる。

一方、負のフェランチ効果は、送電端に設置された系統の無負荷時に発生するものである。この負のフェランチ効果による異常電圧降下というのは架空線路の誘導性が補償用直列コンデンサにより容量性にかわる為で、送受電両端間の容量リアクタンス $-jX$ に対地分布静電容量の存在により生じる進相電流 jI_0 （受電端電圧基準）が流れることによって、等価的容量リアクタンス部分に正の電圧降下 XI_0 を生じてしまうことに基づいているものである。ここに、負のフェランチ効果が生じる為には、直列コンデンサが送端側に設置され、しかも、系統の全誘導リアクタンス $X(=X_B+X_L+X_R)$ のうち送電端変圧器の漏洩リアクタンス X_B と線路途中の誘導リアクタンス X_L の和が、補償用直列コンデンサの容量リアクタンス X_C より小さくなればよいことがわかる。すなわち、 $X_B+X_L < X_C$ X_R : 受電端変圧器の漏洩リアクタンス、また、過補償の場合には系統のリアクタンスが容量性になるために受電端電圧は下がり常に負のフェランチ現象が発生しているような状態となる。Fig.3に示したモデル系統は直列コンデンサによる負のフェランチ効果を概念的に表わしたものである。簡単のために線路途中の誘導リアクタンスは送受電両端変圧器の誘導リアクタンスに分配して、直列コンデンサとともに集中定数として取り扱っている。(b)図からわかるように、軽負荷時の未調

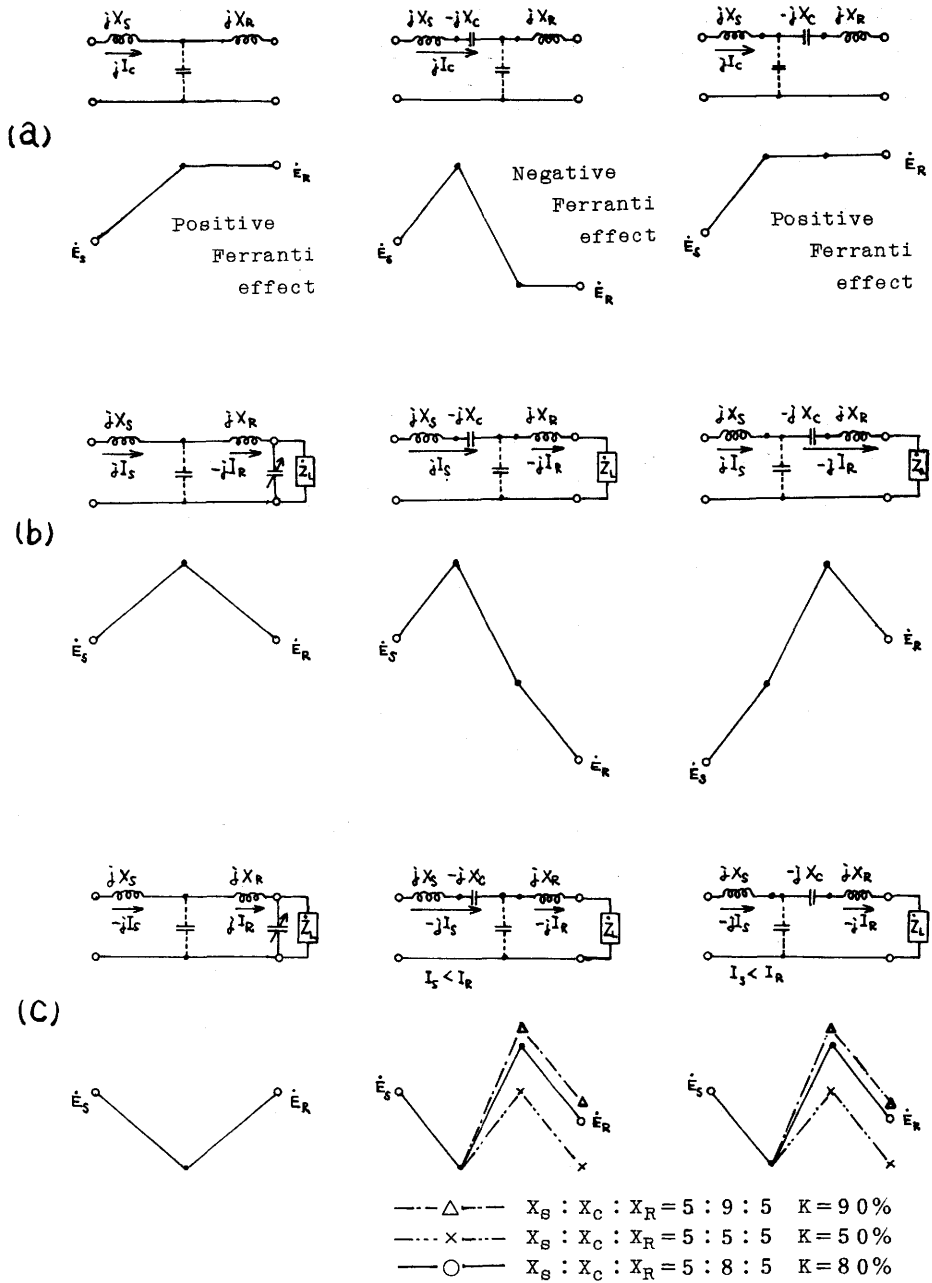


Fig. 3 Electrical potential distribution-model

(a)no-load (b)light-load (c)heavy-load

相系統においても送電端に設置すれば受電端の電圧は下がるが、これは軽負荷であるために受電端側で、遅負荷電流と受電端側の誘導リアクタンスとの積にて負のフェランチ現象と類似の状態になるからである。そこで、直列コンデンサの容量リアクタンスが大きくなればさらにこの電圧降下は激しいものとなってくる。また、重負荷時には、(c)図で示されるように、未調相の場合、線

路の電流は遅負荷電流に支配される為に、負荷が大きくなるにつれ、また、直列コンデンサの容量が大きくなるにしたがい、負のフェランチ現象に類似の現象が現われることになる。ただし、この時には容量リアクタンスは逆に小さくなる傾向にある。したがって、負のフェランチ現象の要因としては、対地分布静電容量による充電電流の存在の他に、補償度の大きさがあげられる。しかし、過補償になれば同期機の乱調や自己励磁現象により安定度が低下していくので直列コンデンサ補償度の上限を決定する必要にせまられることになる。

5 結 言

本稿では、補償された送電系統における直列コンデンサの設置地点について比較・検討してきた。その結果、直列コンデンサ方式では無負荷、有負荷を問わず、基本的理念として、直列コンデンサは送電端側に設置すべきであることがわかった。

また、無負荷時に生ずるフェランチ効果には正・負の2種類があり、特に負のフェランチ効果が存在することを明らかにした。すなわち、正のフェランチ効果は、補償されない系統の無負荷時と補償された系統における受電端設置の無負荷時に発生するのに対して、負のフェランチ効果は補償された系統において、送電端設置でしかも補償度の高い場合の無負荷時に生じることを指摘している。一方、正のフェランチ効果は無負荷時における受電端での電圧上昇であるのに対し、負のフェランチ効果は無負荷時における受電端での電圧降下である。また、正のフェランチ効果は分布定数としての誘導リアクタンスの存在によって生じるが、負のフェランチ効果は集中定数としての容量リアクタンスによってもたらされるという相違のあることを示している。今後は経済的側面からさらに、電力潮流、送電損失などを考慮して、直列コンデンサの設置地点のあり方を検討していきたい。なお、直列コンデンサを分割して設置するという点についても今後の吟味を必要とする。

参 考 文 献

- 1) Homer M. Rustebakke, "Self-excited oscillations in a transmission system using series capacitors", IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, Vol PAS-89, NO. 7, SEPT/OCT. 1970
- 2) Colin E. J. Bowler, Donald N. Ewart, and Charles Concordia, "Self excited torsional frequency oscillations with series capacitors", IEEE PAT-92 1973
- 3) R. H. Hartlex, R. G. Farmer, and L. A. Kilgore, etc, "Ehv series capacitor applications considering subsynchronous oscillations", Cigre Report 31-06 1974
- 4) A. F. Pesonen, "400KV Series Capacitor at Kangasala", Electricity in Finland 38 1965 № 2
- 5) 川本, 長谷川, 鈴木, 斉藤, "電力系統におけるフェランチ効果について", 福井大工報 23 21(1977)
- 6) 斉藤, 川本, 鈴木, "系統における受端変圧器の漏洩リアクタンスについて", 電気学会 北陸支部連合大会講演論文, D-12 157(1975)